



HAL
open science

Les procédés de gazéification comme alternative pour la valorisation de boues de stations d'épuration des eaux usées

J-H Ferrasse, I. Seyssiecq, N. Roche

► **To cite this version:**

J-H Ferrasse, I. Seyssiecq, N. Roche. Les procédés de gazéification comme alternative pour la valorisation de boues de stations d'épuration des eaux usées. *Environnement, Ingénierie & Développement*, 2003, N°30 - 2ème Trimestre 2003, pp.20-24. 10.4267/dechets-sciences-techniques.2446 . hal-03178157

HAL Id: hal-03178157

<https://hal.science/hal-03178157>

Submitted on 23 Mar 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

LES PROCÉDÉS DE GAZÉIFICATION COMME ALTERNATIVE POUR LA VALORISATION DE BOUES DE STATIONS D'ÉPURATION DES EAUX USÉES

J-H Ferrasse, I. Seyssiecq, N. Roche

Laboratoire en procédés propres & environnement (L2PE – EA844)

IUT de Marseille – Université d'Aix-Marseille

Le devenir des boues de stations d'épuration des eaux usées (Step) est un problème crucial posé aux pays industrialisés. En effet la quantité de boues produite en Step ne va cesser d'augmenter avec les croissances démographique et économique, ainsi que le nombre et la performance des Step des eaux usées. Actuellement, le traitement des boues de Step se fait par différentes filières, dont le nombre est limité. Quel que soit le devenir de ces filières et sans créer de polémiques particulières elles ne pourront, dans tous les cas, pas absorber ce volume croissant. Il devient dès lors nécessaire de diversifier les méthodes de traitement pour répondre aux problèmes posés par la gestion de ce déchet. Dans ce cadre, les nouvelles filières de traitement par valorisation thermochimiques semblent des plus intéressantes. En effet, elles présentent en plus de la capacité de traitement, l'avantage de produire des composés « stockables » et facilement « valorisables ». Nous traiterons ainsi, dans cet article, de l'intérêt de développer les procédés de gazéification des boues de Step.

The problem of wastewater treatment plant sewage sludge is becoming crucial. Indeed the quantity of sewage sludge will increase with the population and the economic developments, the rise of the number of treatment plants and their better performance. Sewage sludge treatment is at the moment realised in limited ways. Whatever the future of those ways and without creating polemics, they will not be able, to absorb this increasing volume. It consequently becomes necessary to diversify the methods of treatment to answer the problems arising from the management of this waste. Within this framework, the new thermochemical ways of treatment by valorisation seems more interesting. Indeed, they present in addition to the advantage of the possibility of processing, the capacity to easily produce "storable" and valuable compounds. Thus will treat, in this article, the interest to develop the processes of gasification of waste water sewage sludge.

INTRODUCTION

La quantité de boue de Step produite ne cesse d'augmenter du fait des croissances démographique et économique ainsi que du développement du nombre et de la capacité des Step. La France compte actuellement quelques 12 000 Step qui produisent environ 850 000 tonnes de boues par an (exprimées en tonnes de matière sèche) [5]. On peut considérer qu'à l'horizon 2005, cette production atteindra 1,3 Mt, en raison notamment de l'application de la directive européenne 91/271 de 1991 sur les eaux résiduaires. Cette directive impose, entre autres, une amélioration des rendements épuratoires ainsi que le traitement des effluents domestiques de toute commune de plus de 2 000 équivalent-habitants. On est donc en droit de se poser la question de savoir comment absorber cette augmentation non négligeable de la production de ce déchet.

La ré-utilisation ou la valorisation des boues issues de Step se fait actuellement selon trois filières principales. Il s'agit de l'utilisation agricole sous forme de compost ou par épandage direct, la mise en décharge et les procédés d'incinération [5]. L'évolution des possibilités d'épandage est à moyen terme limitée en quantité, du fait notamment de la disponibilité de terrains et de l'impact médiatique de cette technique. La filière du compostage devra être pérennisée : si il est vrai que le produit du compost doit bénéficier d'un agrément avant la mise en vente, le procédé de compostage devrait lui aussi être encadré par des normes juridiques avant mise en service dans le cadre du traitement de déchets.

Depuis juillet 2002, seuls les déchets ultimes sont acceptés en décharge. Même si la transposition aux boues de la notion de déchets ultimes reste floue, la pérennisation d'une telle filière n'apparaît pas envisageable pour les boues en sortie de Step. L'application actuelle d'un taux minimum de siccité et l'éventualité d'un taux maximum de matière organique (à l'instar de l'Allemagne) obligerait à l'abandon de cette filière pour les boues issues de Step.

La filière thermique est, quant à elle, en pleine expansion. En particulier la co-incinération de boues avec des déchets

ménagers semble offrir un avantage sur le coût de traitement^[1]. Cependant, la mise aux normes récente de nombreux incinérateurs et de ce fait le remaniement du parc actuel sont d'une incidence encore mal évaluée sur la prise en charge des boues par cette filière. L'utilisation des boues dans les fours de cimenteries permet une élimination et une valorisation aisée de ce résidu. Mais cette filière est très concurrentielle. Elle demeurera donc marginale, eu égard aux capacités d'utilisation de boues par ce procédé et aux problèmes de proximité entre cimentiers et unités d'épuration (limitation des coûts de transport).

Enfin, en ce qui concerne la filière du séchage thermique, elle ne constitue qu'un intermédiaire, souvent préalable indispensable, pour la valorisation et/ou l'élimination du déchet.

Sous cette double contrainte, augmentation de la production et stagnation voire diminution des possibilités d'évacuation, il devient nécessaire de diversifier les méthodes de traitement des boues pour répondre aux problèmes posés à la fois par la gestion de ce déchet mais aussi par sa grande variabilité.

C'est pourquoi, dans cet article, nous nous intéressons plus particulièrement à la possibilité de valoriser les boues résiduelles par procédé de gazéification.

LA GAZÉIFICATION DE BOUES DE STATION D'ÉPURATION

La gazéification, appliquée aux boues de Step pourrait être définie comme la transformation totale en gaz de la matière organique ne laissant comme sous-produit que des cendres minérales. Ce procédé est classé dans la famille des procédés thermo-chimiques où l'on trouve également la pyrolyse, l'oxydation en voie humide et la combustion.

C'est un procédé ancien longtemps appliqué exclusivement au charbon pour la production du gaz de ville (procédé du « gaz à l'eau »). Le gaz produit est principalement composé de dihydrogène, de monoxyde et dioxyde de carbone, de méthane et de vapeur d'eau. Globalement, ce gaz est un gaz combustible. La présence de dihydrogène n'est pas relatée comme inquiétante du fait de la stœchiométrie du mélange.

Un regain d'intérêt pour ce procédé a vu le jour il y a une vingtaine d'années^[3] grâce à l'amélioration sensible des performances des turbines à gaz et à son application à la biomasse (bois, bagasse,...). Dans ce cadre, les technologies favorisant les procédés de petites tailles et de proximité ont été développées.

La gazéification se différencie de la pyrolyse par le fait que le carbone est totalement converti en gaz, à des températures pouvant aller de 800 à 2 000°C, sans production de phase liquide ou solide (en dehors du résidu constitué de cendres). La dégradation de la matière organique est due à deux facteurs : la température du produit et la concentration d'oxygène présent dans le réacteur. La gazéification étant une réaction endothermique, l'apport de chaleur est généralement réalisé par la combustion partielle du matériau initial avec un apport d'air ou d'oxygène en défaut stœchiométrique, appelé alors agent oxydant. Cet apport peut aussi se faire par circulation d'un matériau inerte « chaud ». De ce fait, la frontière avec la pyrolyse n'est pas toujours franche.

Les boues de Step, un matériau « valorisable » par gazéification

Les essais de gazéification de boues sont relativement récents et ont été menés essentiellement par des constructeurs. A ce jour, il n'existe qu'un seul projet d'usine de gazéification de boues^[16], dont la mise en route est incertaine. De ce fait, les données disponibles sont rares et dispersées.

Pour la filière boue il semble se profiler deux tendances : une utilisation de la boue seule^[13] ou une utilisation en co-produit mélangé avec du charbon ou une autre biomasse^[10]^[28]. On constate dans le tableau I que la boue sèche de Step possède des caractéristiques énergétiques (PCI) proche de celles des matériaux traditionnellement utilisés en gazéification^[19]. Par contre, la faible siccité des boues de Step et la composition variable d'une boue à une autre, nous conduisent à de nouvelles réflexions :

- la siccité initiale (proche de 80 %) pose la question du séchage thermique^[7]^[16] ou du mélange avec d'autres biomasses,
- l'impact de la teneur importante en azote n'a été jusqu'ici que peu évalué.

Tableau I : Comparaison des compositions types d'une boue, d'un charbon et d'une biomasse^[19].

Composition type	Boues urbaines séchées	Charbon (Daw mill)	Biomasse (copeaux de bois tendre non traité)	
C	30,9 45,6	69,3 79,5	49,3 49,8	% MS % MV
H	4,6	4,9	6	% MV
O	26,5	12,2	43,8	% MV
N	4,5	1,38	0,4	% MV
S	1,1	1,7	0,02	% MV
MV	54,2	28,5	84,6	% MS
Cendres	32,3	12,8	1,1	% MS
Humidité	70-90	3,2	34,9	% base sèche
Pouvoir calorifique inférieur	10 966	26 218	18 115	MJ/kg MS

Rappelons que dans le cas du traitement de déchet, le but n'est pas la récupération d'énergie mais la minimisation de l'ajout de combustible « noble » pour traiter ce déchet. Cela a deux conséquences :

- la notion d'auto-thermicité fréquemment utilisée pour l'incinération devra être revue dans le contexte de la technologie de gazéification,
- la compatibilité des procédés de traitement de boues avec le protocole de Kyoto, sur la production de gaz à effet de serre, doit être systématiquement évaluée sur la filière complète (transport + ajout de combustibles + traitement des sous produits + ...).

Les technologies de gazéification

Les informations données dans ce paragraphe ne concernent pas uniquement la gazéification des boues issues de Step mais d'autres biomasses (bois...). Elles permettent cependant de donner quelques pistes de réflexions quant au choix d'un réacteur pour les boues de Step, en l'absence de données tangibles dans la littérature actuelle.

La plupart des gazogènes sont des lits fixes ou des lits fluidisés. Pour les lits fixes, une revue comparative est disponible dans Beenackers [4]. Pour les lits fluidisés, on trouvera une revue comparative dans Warnecke [27] et McKendry [17]. Enfin une revue plus générale comprenant une étude de coût est disponible dans Bridgwater[8] et Beenackers [4]. Il est à noter que les études effectuées jusqu'à présent sur les boues ont été réalisées sur des granulés secs.

Les lits fixes

Deux types de lits fixes sont traditionnellement distingués selon que la circulation de gaz et de solides se fait à co ou à contre-courant (figure 1).

Une étude complète pour les boues est disponible dans Midilli et al. [18] pour un lit fixe à co-courant descendant. La figure 1-a présente le schéma de principe d'un tel procédé. Il est possible de distinguer quatre zones :

- La zone de séchage (20-200°C). La biomasse entre dans le gazogène et l'humidité est enlevée en utilisant la chaleur générée dans la zone d'oxydation,
- La zone de pyrolyse (200-500°C). Une première dégradation thermique de la biomasse provenant de la zone de séchage est réalisée. La quantité de solide sec peut alors passer de 50 à 90 %,
- La zone d'oxydation (1 000-1 200°C). Les produits volatils de la pyrolyse sont partiellement brûlés. C'est la seule zone exothermique,
- La zone de réduction (800-1 000°C). Les résidus solides et les gaz de pyrolyse sont convertis en gaz.

La figure 1-b présente un gazogène en lit fixe à contre courant. Les différentes zones de séchage, pyrolyse, oxydation

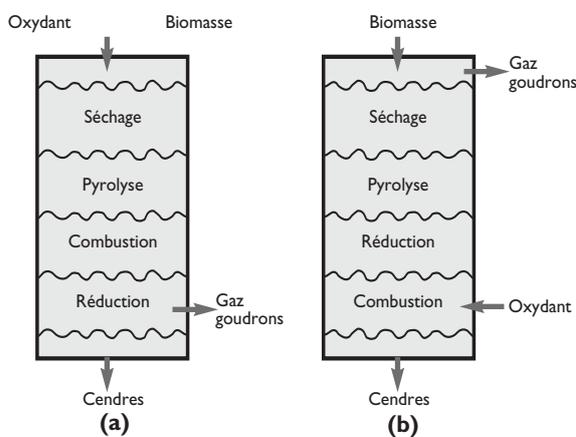


Figure 1 : Schéma de principe de lits fixes à co-courant (a) et contre courant (b).

et gazéification se retrouvent pareillement. La différence est due au point d'injection de l'agent oxydant. Le fonctionnement à contre courant permet au gaz chaud en sortie de réchauffer le produit entrant. Cette différence permet d'alimenter ce type de réacteur avec une biomasse ayant jusqu'à 50 % d'humidité selon Beenackers [4].

Les lits fluidisés

Il existe deux types de lits fluidisés pour la gazéification : les lits fluidisés bouillonnants et les lits fluidisés circulants (figure 2).

Le lit est constitué d'un solide inerte ou catalytique [20] dans lequel la biomasse réagit avec de la vapeur et de l'oxygène ou de l'air. Les lits fluidisés circulants [16] sont en général les plus utilisés. Le fait d'avoir une vitesse de gaz importante permet d'obtenir de bons transferts de masse et de chaleur et des conditions uniformes. Un cyclone en tête de réacteur permet de réinjecter les particules n'ayant pas réagi.

L'agent oxydant

L'agent oxydant utilisé va influencer de façon importante la composition des gaz produits [15]. On peut distinguer les cas où l'agent oxydant contient de l'oxygène (air, oxygène pur), des autres cas (vapeur d'eau, absence d'agent donc pyrolyse).

- Dans le cas d'un gazogène sous air, un mélange gazeux de faible pouvoir calorifique inférieur (PCI) est obtenu, typiquement de 4 à 6 MJ.Nm⁻³, en raison de la forte dilution par l'azote entrant avec l'air. Rappelons que le PCI du méthane pur est de 35,83 MJ.Nm⁻³.
- Dans le cas d'un gazogène sous oxygène, on obtient un mélange gazeux d'une valeur de PCI (10 à 18 MJ.Nm⁻³) moyenne. Cette option représente un surplus économique et la gestion supplémentaire de l'approvisionnement en oxygène.
- Dans le cas de la vapeur d'eau, elle a pour conséquence d'augmenter la fraction d'hydrogène dans les gaz produits [22] [23].
- Une quatrième possibilité est la gazéification thermique à « haute température » (850°C) selon le procédé Lurgi Rhurgas [10]. Les molécules hydrocarbonées sont alors

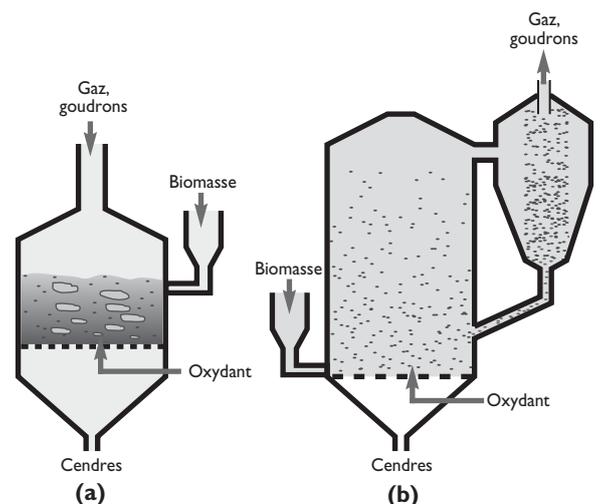


Figure 2 : Lits fluidisés bouillonnant (a) et circulant (b)

Tableau 2 : Compositions caractéristiques des gaz en sortie selon le type de réacteurs pour une biomasse de type bois [10].

	Composition des gaz (% sec volumique)					Pouvoir calorifique* MJ m ⁻³	Quantité de goudrons et poussières	
	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	N ₂		Goudrons	Poussières
Lit fluidisé, air	9	14	20	7	50	5,4	moyenne	forte
Contre-courant, air	11	24	9	3	53	5,5	forte	faible
Co-courant, air	17	21	13	1	48	5,7	faible	moyenne
Co-courant, oxygène	32	48	15	2	3	10,4	faible	faible

* inférieur / supérieur non distingué par l'auteur

craquées en molécules gazeuses sans ajout d'agent oxydant. Ce dernier cas peut aussi être assimilé à une pyrolyse effectuée à haute température comme l'ont présentée Inguano et al. [12] et Storm et al. [24]. En effet l'auteur [10] ne mentionne pas si le taux de conversion du carbone en gaz est total. Cette parenté est confirmée par le PCI élevé du gaz de 23 MJ.Nm⁻³ et une composition montrant l'absence quasi totale de gaz diluants, intérêt majeur de cette option.

L'influence des différents agents oxydant est résumée dans le tableau 2. La différence entre les PCI des gaz produits ne doit pas masquer, en particulier dans le cas de la gazéification thermique, la nécessité de réutiliser une partie de ces gaz pour fournir l'énergie à la réaction. Par conséquent, le choix de l'agent oxydant optimal doit plutôt se faire en fonction de l'utilisation souhaitée pour le gaz produit.

Le devenir des métaux lourds lors du traitement thermique de boues.

Le devenir des métaux lourds a été étudié pour les procédés d'incinération [14] ou de pyrolyse [14] [24] [30]. Il existe quelques données pour la gazéification de boues [13] [21]. Ces données sembleraient confirmer que les résultats obtenus en pyrolyse sont transposables à la gazéification :

- La majorité des métaux sont piégés dans les cendres et sont difficilement lixiviables,
- Le mercure est vaporisé mais la teneur dans le gaz est inférieure à la valeur maximale autorisée dans la réglementation allemande.

Avantages et inconvénients des différents réacteurs

Des résultats d'expériences sur du bois obtenues pour différents types de réacteurs et d'agents oxydants sont succinctement présentées dans le tableau 3. En le croisant avec le tableau 2, on peut en tirer les conclusions suivantes :

- les pouvoirs calorifiques des gaz produits en gazéification sont peu dépendants du type de réacteur utilisé. Le paramètre influent reste principalement l'agent oxydant.
- il est difficile de dégager des différences dans la composition des gaz pour les différents types de réacteur de gazéification. Sur un ensemble de critères dont la qualité des gaz en terme de taux de poussières et goudrons les lits fluidisés et le lit fixe à co-courant semblent plus avantageux [4] [27].

Tableau 3 : Composition du gaz sec en % volumique en fonction de l'agent oxydant pour une boue de Step dans un lit fluidisé [11].

Agent oxydant	Air	Air enrichi à 45 % en oxygène	Gazéification thermique sans agent
H ₂	12,2	20,7	29,8
CO	20,9	37,9	24,9
CH ₄	1,6	4,6	19
C ₂₊	0,6	0,8	12,3
CO ₂	9,7	11,4	12
N ₂	54,8	24,4	1
Autre	0,2	0,2	1
Total	100	100	100
P.C. Inférieur (MJ/m ³)	5,2	9,3	22,7

Le gaz produit est un sous produit de déchet. Le produit de sa combustion est donc soumis à la même réglementation que celle des incinérateurs de déchets. Dans ce cadre, pour les expériences sur les boues, il est important de noter le faible taux de dioxines et furanes [13].

Il est délicat de classer les procédés par ordre de mérite. Cependant, le procédé de gazéification de boues de Step en lit fixe à contre courant présente un avantage certain : celui, à l'heure actuelle, d'accepter la plus basse siccité initiale.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Un traitement global des boues de Step par une seule filière ne semble actuellement pas envisageable et il est donc intéressant de développer de nouveaux procédés pour pouvoir s'adapter au mieux à chaque unité d'épuration. Les procédés de gazéification pourraient être proposés comme procédés complémentaires.

D'autres avantages sont régulièrement avancés en faveur de la gazéification. Ils sont présentés ici et demandent à être validés :

- la production d'un sous produit principal : un gaz de synthèse facilement combustible [10].
- la réduction importante du volume des boues,
- l'utilisation de hautes températures et/ou d'un environnement réducteur associés à un système peu onéreux maintiennent les émissions de gaz soumis à des normes strictes en dessous des limites légales pour les dioxines et les furanes [13],
- la destruction thermique des virus et autres organismes pathogènes. Elle nécessite un temps de séjour inférieur à la seconde à 850°C (1). Cette durée est compatible avec ce type de procédés.
- le piégeage des métaux lourds dans des cendres vitrifiées et par conséquent plus difficilement lixiviables que dans les mâchefers d'incinération [13],
- un bilan énergétique optimisé. La possibilité de valoriser une boue biologique sans transport, sans traitement particulier, sans stockage contribue à la minimisation des coûts de fonctionnement globaux.
- la possibilité d'obtenir un crédit en CO₂. Cette analyse

par cycle de vie proposée par Bridle & Skrypsky-Mantele [9] est strictement appliqué au procédé de pyrolyse « Ener-sludge ». Néanmoins ils proposent d'intégrer la gazéification dans ce qu'ils nomment « les nouvelles technologies thermiques » pour la question du crédit de CO₂. Cette étude englobe le séchage de la boue et la combustion du gaz de synthèse pour produire de l'électricité.

La filière de la gazéification des boues de Step souffre d'un fort handicap : elle est la moins développée et la moins étudiée actuellement.

A l'heure actuelle, les procédés de gazéification appliqués à des matières premières comme le bois ou la biomasse au sens large, sont développés dans le sens de petites unités locales et autonomes. Ceci leur confère l'avantage d'utiliser une matière première de proximité (faibles coûts de transports) et d'alimenter en énergie un réseau local [2],[23].

Dans le cas des boues de station d'épuration, on pourrait envisager de traiter ce déchet à l'aide d'une unité de gazéification basée au cœur même de la station, produisant tout ou partie de l'énergie nécessaire au traitement de ce déchet.

J.-H. Ferrasse, I. Seyssiecq, N. Roche

*Laboratoire en procédés propres & environnement (L2PE – EA844)
IUT de Marseille – Université Aix-Marseille III
BP 157, 13388 Marseille Cedex 13 - France
nicolas.roche@univ.u-3mrs.fr

Note

(1) La question du taux de survie d'un micro-organisme après un procédé thermique est peu regardée. Nous proposons d'utiliser la formule donnée par l'US EPA citée dans l'étude européenne (Study Contract N° B4-3040/2001/322179/MAR/A2) pour déterminer le couple (température - temps de séjour) d'une boue (avec θ en degré Celsius) : Nombre de jours = $(131,7 \times 10^6) / 10^{0,14\theta}$

Bibliographie

[1] Agences de l'eau (les), « Audit environnemental et économique des filières d'élimination des boues d'épuration urbaines », 1999

[2] Babu S.P., Thermal gasification of biomass technology developments: end of task report for 1992 to 1994, Biomass and Bioenergy, vol. 9, pp 271-285, 1995

[3] Beenackers A. A. C. M., Bridgwater, A. V., "Status and future of thermochemical processing of biomass", Solar Energy R&D in the European Community, Series E: Energy from Biomass, vol. 5, pp 34-42, 1984

[4] Beenackers A.A.C.M., Biomass Gasification in Moving beds, a review of European Technologies Renewable Energy, vol. 16, pp. 1180-1186, 1999

[5] Boutin O., Roche N., La valorisation des boues issues de stations d'épuration par des procédés thermochimiques : les procédés de gazéification, une alternative dans le traitement des boues – Réalité et perspectives, L'Eau, l'Industrie les Nuisances, n° 248, pp 35-44, 2002

[6] Braekman-Danheux C., D'haeyere A., Fontana A., Laurent P., Upgrading of waste derived solid fuel by steam

gasification, Fuel, vol. 77, n° 1/2, pp 55-59, 1998

[7] Brammer J.G., Bridgwater A.V., The influence of feedstock drying on the performance and economics of a biomass gasifier –engine CHP system, Biomass and Bioenergy 22 pp 271–281, 2002

[8] Bridgwater A.V., The technical and economic feasibility of biomass gasification for power production, Fuel, vol. 74, n°5, pp 631-653, 1995

[9] Bridle T., Skrypsky-Mantele S., Assessment of sludge reuse options : a life cycle approach, Water and Science Technology, vol. 41, pp 131-135, 2000

[10] Furness D.T., Hogget L.A., Judd S.J., Thermochemical Treatment of sewage sludge Journal of the chartered institution of water and environmental management, vol. 14, 2000

[11] Hamilton C.J., Gasification as an innovative method of sewage sludge disposal Journal of the Chartered Institution of Water and Environmental Management, vol.14, pp. 89-93, 2000

[12] Inguano M., Dominguez A., Menendez J.A., Blanco C.G., On the pyrolysis of sewage sludge : the influen-

ce of pyrolysis condition on solid, liquid and gas fractions, J. of Analytical and Applied Pyrolysis, vol. 63, pp 209-222, 2002

[13] Jaeger M., Mayer M., The Noell conversion process – a gasification process for the pollutant-free disposal of sewage sludge and the recovery of energy and materials, Water Science and Technology, vol. 41, n°8, pp 37-44, 2000

[14] Kaminsky W. ; Kummer A.B., Fluidized bed pyrolysis of digested sewage sludge J. of Anal. and Applied Pyrolysis, vol. 16, pp. 27-35, 1989.

[15] Lau F.S., The Hawaiian project Biomass and Bioenergy, vol. 15, n°3, pp. 233-238, 1998

[16] Lynch S., Crowe N., Hamilton C.J., The benefits of drying and gasification of sewage sludge, Environmental Protection Bulletin, vol. 60, pp. 3-9, 1999

[17] McKendry P., Energy production from biomass (part 3): gasification technologies, Bioresource Technology, vol. 83, pp 55 –63, 2002

[18] Midilli A., Dogru M.,Howarth C., Ling M., Ayhan T., Combustible gas production from sewage sludge with a downdraft gasifier, Energy Conversion and Management, vol. 42, pp. 157-172, 2001

[19] Phyllis, Base de donnée de composition de biomasses et de déchets sur Internet : <http://www.ecn.nl/Phyllis>

[20] Rapagnà S., Jand N., Kiennemann A., Foscolo P.U., Steam-gasification of biomass in a fluidised-bed of olivine particles, Biomass and Bioenergy, vol. 19, pp 187-197, 2000.

[21] Reed G.P., Dugwell D.R., Energy & Fuels, pp 794-800, 2001

Kandiyoti R., Control of trace element

in gasification: distribution to the out-

put streams of a pilot scale gasifier,